

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В.Н. КАРАЗІНА

**СЕРДЕГА ІРИНА ВОЛОДИМИРІВНА**

УДК 537.86

**КОЛИВНА ДИНАМІКА ДОМІШКОВИХ НАНОКОМПЛЕКСІВ ПРИ  
ФОРМУВАННІ ТЕРАГЕРЦОВИХ СМУГ НЕЛІНІЙНО-  
ОПТИЧНОГО ПІДСИЛЕННЯ У КВАРЦОВИХ ВОЛОКНАХ**

Спеціальність 01.04.03 – радіофізика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2020

Робота виконана на кафедрі квантової радіофізики факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, доцент  
**Фелінський Георгій Станіславович**,  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
доцент кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Маслов Вячеслав Олександрович**,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
завідувач кафедри квантової радіофізики;

кандидат фізико-математичних наук, с.н.с.  
**Бугайчук Світлана Анатоліївна**,  
Інститут фізики НАН України, м. Київ,  
старший науковий співробітник.

Захист відбудеться “05” травня 2021 р. о 13.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитися у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий “01” квітня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Юрій АРКУША

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Суттєвий прогрес фундаментальних досліджень нелінійної фотон-фононної взаємодії, зокрема вимушеного комбінаційного розсіяння (ВКР) світла сформував останнім часом новий напрям прикладних розробок – ВКР фотоніку. Широке практичне застосування таких фотонних пристроїв, як волоконні ВКР підсилювачі (ВКРП) та безінверсні ВКР лазери (ВКРЛ) вже докорінно змінили можливості сучасних телекомунікаційних систем, розширивши їх смугу робочих частот до терагерцового діапазону. Особлива складність процесів нелінійної фотон-фононної взаємодії та коливної динаміки домішкових наноконструкцій в аморфній серцевині оптичних волокон проявляється у формуванні профілів ВКР підсилення світла у вигляді неперервного та нерегулярного континууму, який поширюється на область стоксових частот понад  $1000\text{ см}^{-1}$  (30 ТГц). Але саме неперервність та континуальний характер ВКР підсилення світла у звичайних волокнах на основі кварцового скла забезпечує безпрецедентну смугу підсилення оптичних сигналів, що вже широко застосовується у високоякісних ВКРП зі смугами пропускання понад 10 ТГц. Ці волокна також знаходять все більш широке застосування як активне середовище у безінверсних ВКРЛ, оскільки тільки вони зараз спроможні забезпечити найвищу якість випромінювання на будь-якій довжині хвилі як всередині всіх телекомунікаційних вікон прозорості, так і за їх межами, в інших частинах інфрачервоного та видимого діапазону довжин хвилі.

Застосування одномодових волокон в пристроях ВКР фотоніки має принциповий характер, перетворюючи звичайне скло у високоефективне нелінійне середовище, яке здатне підсилювати світло в процесі його розповсюдження вздовж комунікаційного волокна та генерувати когерентне випромінювання без інверсії населеностей електронних рівнів енергії. Однак, широка смуга неперервного континууму спектра ВКР підсилення світла дуже ускладнює проблему дослідження коливної динаміки домішкових наноконструкцій в аморфному склі. У переважній більшості аморфних сполук, на відміну від кристалічних форм, в експериментальних спектрах неможливо ідентифікувати не тільки окремі фононні моди, але їх загальну кількість. Разом з тим, аналіз фізичних особливостей індивідуального та колективного впливу фононних коливань у серцевині волокон, які власне визначають ефективність підсилення стоксових сигналів, у даний час викликають підвищений інтерес. Результати теоретичного відтворення профілю ВКР підсилення світла з максимальною точністю, а також їх доповнення даними експериментальних досліджень підсиленого спонтанного випромінювання (ПСВ) та оптичних шумів складають надійну фундаментальну основу для вирішення багатьох практичних проблем сучасної радіофізики. Зокрема, отримана в роботі аналітична

апроксимація профілів ВКР підсилення шляхом оптимальної гаусової декомпозиції є головним початковим етапом моделювання широкого кола пристроїв ВКР фотоніки сучасними радіофізичними методами. Саме засоби ВКР фотоніки надають унікальну можливість практичного освоєння повного вікна прозорості волокон у 60 ТГц. Серед таких пристроїв, що вже широко застосовуються на практиці, виділяються підсилювачі з розширеною смугою підсилення понад 100 нм (з нерівномірністю  $\sim 0,7$  дБ), багатохвильові ВКР лазери, а в перспективі – радіофотонна елементна база для терагерцових телекомунікацій.

Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною як з фундаментальної, так і прикладної точок зору і належить до розділу сучасної радіофізики. Робота обумовлена необхідністю розробки нових підходів щодо розрахунку і чисельного моделювання широкосмугового ВКР підсилення, детальних досліджень оптичного шуму ВКР підсилювачів, а також потребами поглибленого розуміння фізичних процесів нелінійно-оптичного підсилення стоксового сигналу при його розповсюдженні в оптичному волокні.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота над дисертацією була виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка у рамках держбюджетних науково-дослідних тем «Дослідження ефектів взаємодії електромагнітних та акустичних полів з впорядкованими, наноструктурованими та біологічними системами для створення новітніх технологій» (номер держреєстрації 0111U005265) та «Дослідження взаємодії електромагнітних, акустичних та магнітних полів зі структурованими та нанорозмірними об'єктами для створення новітніх біологічних та інформаційних технологій» (номер держреєстрації 0116U002564).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає в експериментальних дослідженнях нелінійного оптичного підсилення світла та числовому моделюванні коливної динаміки домішкових наноконкомплексів, яка формує профілі ВКР підсилення світла в різних типах одномодових волокон на основі кварцового скла.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та розв'язані наступні задачі:

- проаналізувати наявні експериментальні дані вимірювання підсиленого спонтанного випромінювання за схемою із зустрічною накачкою кварцового одномодового волокна в області 1420 нм ... 1650 нм;
- вивчити особливості коливної динаміки домішкових наноконкомплексів при формуванні абсолютних профілів ВКР підсилення шляхом багатомодової декомпозиції та калібрування за відомими спектрами СКР в кількох кварцових волокнах;

- вдосконалити методику розділення вимушених та спонтанних внесків у вимірних спектрах підсиленого спонтанного випромінювання;
- Розробити методику гаусової фільтрації шумів вимірювального обладнання при реєстрації підсиленого спонтанного випромінювання в режимі холостого ходу нелінійного оптичного підсилювача.

*Об'єктом дослідження* є нелінійний оптичний процес вимушеного комбінаційного розсіяння (ВКР), що проявляється в експериментальних спектрах підсиленого спонтанного випромінювання від кількох джерел накачки у стандартному волокні, а також в інших типах одномодових кварцових волокон, зокрема у чистому кварцовому волокні типу SMF, германо-силікатному волокні з підвищеною концентрацією домішок  $\text{GeO}_2$  (до 25%), а також у волокнах із  $\text{TiO}_2$ - та  $\text{P}_2\text{O}_5$ -легованою серцевиною.

*Предметом дослідження* є залежність ефективності підсилення світла у кварцових волокнах від потужності накачки і параметрів різних легуючих наноконструкцій, встановлення порогових умов лазерної генерації у цих типах оптичних волокон, а також фізичні особливості стоксових спектрів підсилення, які формуються під впливом аморфних наноконструкцій від різних легуючих домішок у серцевині кварцового волокна.

**Методи дослідження.** У дисертації представлено результати радіофізичних досліджень, що отримані із залученням методів оптичної спектроскопії при вимірюванні підсиленого спонтанного випромінювання, яке є джерелом повного шуму на виході нелінійного оптичного підсилювача, а також методів спектральної декомпозиції з використанням стандартних функцій форми лінії, алгоритм нелінійної регресії Левенберга-Марквардта, чисельні методи апроксимації.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Комплексні дослідження коливної динаміки молекулярних наноконструкцій, що формують профіль ВКР підсилення, методами сучасної радіофізики в різних типах одномодових волокон призвели до наступних результатів:

1. Вперше запропоновано методику експрес-контролю індивідуального зсуву довжини хвилі напівпровідникового джерела накачки від інтенсивності його випромінювання, яка заснована на дослідженні спектрів в розширеній області частот, що об'єднує релеєвський та стоксово зсунутий діапазон частот.
2. Вперше виміряно абсолютне значення максимуму коефіцієнта ВКР підсилення  $g_{Rmax}=0,2 \text{ (Вт}\cdot\text{км)}^{-1}$  пасивним методом в режимі холостого ходу волоконного підсилювача. Метод засновано на вимірюванні сімейства спектрів підсиленого спонтанного випромінювання за різної потужності накачки. Експериментальну апробацію методу проведено в стандартному кварцовому

волокні довжиною 50 км у стоксово зміщеній області частот від  $50\text{ см}^{-1}$  до  $1600\text{ см}^{-1}$  з використанням 4 окремих джерел накачки та за 5-ма фіксованими рівнями вихідної потужності у кожному джерелі. Головна перевага запропонованого методу полягає в суттєвому спрощенні методики вимірювань без використання зовнішніх сигналів.

3. Вперше апроксимовано складні профілі ВКР підсилення континуального типу простою функцією від частоти у вигляді лінійної комбінації 12 гаусових компонент у чистому  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  і  $\text{TiO}_2$  та 11 компонент у  $\text{GeO}_2$  легovanому волокні, які враховують коливну динаміку домішкових наноконкомплексів. Показано, що сильна деформація профілів ВКР підсилення виникає під впливом відносно невеликих концентрацій домішок, які значно збурюють спектр коливних мод молекулярних наноконкомплексів у серцевині волокон. Встановлено, що головні коливні моди в матриці аморфного скла, які формують спектри оптичного підсилення у різних типах волокон, значно змінюються за всіма параметрами коливань – у кілька разів за амплітудою, в межах десятків  $\text{см}^{-1}$  за частотним положенням та сталими загасання.

4. Вдосконалено метод пасивного визначення профілю ВКР підсилення одномодового волокна із чистого кварцового скла шляхом застосування гаусової фільтрації шумів вимірювальної апаратури. Показано, що аналітичну функцію форми профілю ВКР підсилення на основі кількох гаусових компонент можна без додаткових ускладнень адаптувати до експериментальної суміші спектрів підсиленого та спонтанного випромінювання. Головна перевага від отриманого ефекту згладжування шумів на експериментальних спектрах полягає у виключенні можливих оптичних завад в середині волокна та зовнішніх шумів від апаратури електронної реєстрації при одночасному збереженні всіх спектральних особливостей, які викликані коливною динамікою домішкових наноконкомплексів у серцевині оптичних волокон.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані результати поглиблюють і доповнюють знання в області нелінійної волоконної оптики, зокрема коливної динаміки молекулярних наноконкомплексів у серцевині низки поширених волокон. Апроксимація профілів ВКР підсилення методом гаусової декомпозиції дає практично точне аналітичне представлення складних профілів у вигляді простої суперпозиції елементарних функцій. Це суттєво спрощує числові розрахунки при моделюванні широкого кола пристроїв ВКР фотоніки з наперед заданими характеристиками, серед яких надширосмугові оптичні підсилювачі, високоякісні лазери для інфрачервоного і видимого діапазонів та елементи радіо-фотонних пристроїв терагерцових телекомунікаційних систем. Результати експериментальних

досліджень стоксового ПСВ і запропонована методика пасивного визначення профілю ВКР підсилення може бути використана для експрес-аналізу ВКР параметрів волокон як в лабораторіях, так і в умовах промислового виробництва. Запропонований метод гаусової фільтрації шумів виміральної апаратури дозволяє суттєво вдосконалити процедуру пасивного визначення профілю ВКР підсилення одномодового волокна із чистого кварцового скла.

**Особистий внесок здобувача.** Обрання теми, напрямків актуальних досліджень і формулювання мети й завдань було виконано разом з науковим керівником д. ф.-м. н., доц. Фелінським Г.С.

Автором самостійно проаналізовано сучасний стан досліджень в обраному напрямку, підготовлений огляд актуальної літератури за темою дисертації, проведено основну частину обробки даних експериментальних досліджень підсиленого спонтанного випромінювання в одномодовому волокні на основі кварцового скла із багатохвильовим зустрічним накачуванням, за експериментальними даними на спектрах релеевського розсіювання побудовано виміряні залежності довжини хвилі лазерів накачки від їх вихідної потужності, виконано числові розрахунки профілів ВКР підсилення у чистому кварцовому волокні, германо-силікатному волокні з підвищеною концентрацією домішок  $\text{GeO}_2$  (до 25%), у волокнах із  $\text{TiO}_2$ - та  $\text{P}_2\text{O}_5$ - легованою серцевиною, а також отримані аналітичні вирази (5) – (7) для функцій форми профілю ВКР підсилення у досліджених волокнах. За результатами проведених експериментальних досліджень написано наукові статті, взято участь у наукових конференціях.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях:

IEEE 37<sup>th</sup>, 38<sup>th</sup>, and 39<sup>th</sup> Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2017, 2018, 2019; Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; Int. Symp. on Adv. Material Research, ISAMR'2017, Seoul, Korea, March, 17 -19, 2017; XIV, XVII, XVIII Int. Young Scientists' Conf. on Applied Physics, Kyiv, Ukraine, 2016, 2017, 2018; XXIII Galyna Puchkovska Int. School-Seminar "Spectroscopy of Molecules and Crystals". Kyiv, Ukraine, 25 27 Sep, 2017; XIII, XIV Int. conf. «Electronics and Applied Physics», Kyiv, Ukraine, 2017, 2018; II Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем" MEICS-2017, Дніпро, 22-24 листопада 2017; VIII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (УНКФН-8), 2-4 жовтня 2018, Україна, Ужгород; VIII Int. Conf. on Optoelectronic Information Technologies, PHOTONICS – ODS, Ukraine, Vinnytsia, VNTU October 2-4, 2018.

**Публікації.** Результати дисертації відображені у 21 публікаціях: 5 статей у провідних фахових журналах [3-7], розділи у 2 колективних монографіях [1-2] та 14 тез доповідей на конференціях [8-21].

**Структура і зміст роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Вона містить 162 сторінки, із них 113 сторінок основного тексту, 41 рисунок, із них 7 на окремих аркушах, 4 таблиці, 4 додатки, список використаних джерел з 147 найменувань на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* розглядається принципове значення коливної динаміки молекулярних наноконкомплексів для аналізу терагерцових смуг нелінійно-оптичного підсилення у кварцових волокнах. На основі цього обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, що використовувались в роботі, викладено наукову новизну та практичне значення результатів дослідження.

У *першому розділі*, що є оглядовим, розглядається сучасний стан прикладних досліджень в області нелінійної фотон-фононної взаємодії в оптичних волокнах, зокрема методів нелінійної оптики та вимушеного комбінаційного розсіяння (ВКР) для створення волоконних лазерів та оптичних підсилювачів. Виклад фундаментальних особливостей прояву ВКР підсилення світла у кварцових волокнах подано з точки зору практичної реалізації ВКР підсилення світла у кварцових волокнах. Показано, що саме схемо-технічна реалізація ВКР підсилення світла в одномодових волокнах, особливо в конфігурації розподіленого підсилення надає вирішальні переваги застосування нелінійного оптичного підсилення в сучасних телекомунікаційних системах. Проблеми використання ВКРП у системах оптичного інформаційного обміну – нелінійність та теоретично надмірний оптичний шум - розглянуті в розділі як постановка задачі подальших досліджень.

Показано, що надзвичайна простота конструкції ВКРП супроводжується складністю фізичних процесів нелінійного обміну енергією між величезною кількістю оптичних хвиль, що взаємодіють між собою. Це суттєво ускладнює теоретичний аналіз, моделювання та проектування таких пристроїв нелінійної оптики. Тому виклад теоретичних основ моделювання профілів ВКР підсилення в одномодових волокнах містить результати обох фундаментальних підходів – квантового та класичного до розгляду динаміки процесів розсіяння світла в одномодових волокнах.

За напівкласичного підходу до ВКР підсилення у найпростішому випадку



взаємодії між однією хвилею накачки та однією стоксовою хвилею зв'язок між цими хвилями описує система двох зв'язаних рівнянь

$$\frac{dI_s(z, \omega)}{dz} = g_R(\omega) I_p(z) I_s(z, \omega) - \alpha_s I_s(z, \omega), \quad (1)$$

$$\frac{dI_p(z)}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R(\omega) I_p(z) I_s(z, \omega) - \alpha_p I_p(z), \quad (2)$$

де  $\alpha_s$  та  $\alpha_p$  враховують втрати волокна на стоксовій частоті та частоті накачування, відповідно;  $g_R(\omega)$  – коефіцієнт ВКР підсилення,  $I_p$  – інтенсивність накачки,  $I_s$  – інтенсивність стоксової хвилі. Зауважимо, що розв'язок системи рівнянь (1) – (2) в аналітичній формі можна отримати тільки в окремому випадку, а саме в наближенні заданої накачки:

$$I_s(L) = I_s(0) \exp(g_R P_0 L_{eff} - \alpha_s L) \quad (3)$$

тут  $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p$  - ефективна довжина;  $P_0$  – потужність помпування на вхідному кінці волокна, причому  $P_0 = P_p(L)$  у випадку зворотної накачки.

Це дозволило кількісно розрізнити спонтанні та вимушені процеси розсіяння фотонів на коливних станах молекулярних наноконкомплексів серцевини волокна, описати спектральний профіль ВКР підсилення, з'ясувати як його зв'язок, так і відмінність від спектрів спонтанного розсіяння. На завершення наведено кількісний вираз для порогових умов ВКР підсилення світла у волокнах. Це співвідношення визначає умови забезпечення абсолютної прозорості волокна та має принципове значення для моделювання таких важливих параметрів ВКР фотонних пристроїв, як смуга підсилення ВКРП з довільною кількістю джерел помпування або спектральний діапазон, в якому можна отримати високоякісну генерацію волоконних ВКР лазерів

В результаті такого фундаментального підходу створена надійна основа для дослідження спектроскопічних особливостей профілів ВКР підсилення у довільному волокні, зокрема на основі кварцового скла, шляхом їх виділення із експериментальних спектрів спонтанного комбінаційного розсіяння. Зазначимо також, що наведені результати теорії КР активних коливань молекулярних наноконкомплексів в аморфному склі з урахуванням як квантового, так і напівкласичного підходів, є достатнім обґрунтуванням нашої осциляторної моделі та застосування багатомодової декомпозиції на компоненти гаусового типу, що викладені в наступних розділах.

**В другому розділі** наведено оригінальні результати експериментальних досліджень підсиленого спонтанного випромінювання в оптичному ВКР

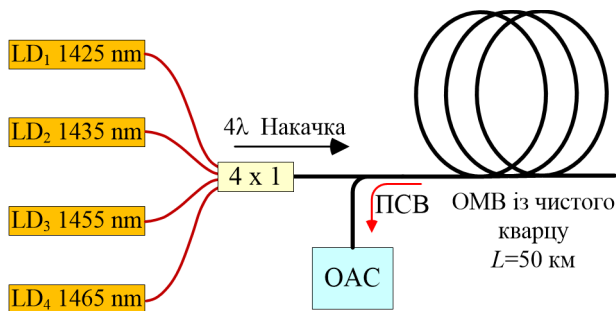


Рис.1. Схема зустрічної  $4\lambda$  ( $LD_1 \dots LD_4$ ) накачки волокна із чистого кварцу довжиною 50 км із реєстрацією підсиленого спонтанного випромінювання за допомогою ОАС. Оскільки ВКР підсилювач включено в режимі холостого ходу, то вся потужність помпування витрачається тільки на підсилення стоксового шуму.

обладнання для реєстрації спектрів. Наведений також короткий опис елементів управління та налаштування оптичного аналізатора спектра, а також структури заголовка файлу, що містить спектральну інформацію, які кількісно описують головні характеристики (роздільну здатність, кількість точок дискретизації, тощо) цифрового представлення отриманих нами спектрів.

Наведено результати досліджень спектрів підсиленого спонтанного випромінювання в режимі холостого ходу ВКР підсилювача. Вперше аналіз спектрів проводився в розширеній спектральній області, яка об'єднує релеєвський та стоксово зсунутий діапазон частот. При аналізі експериментальних даних релеєвських спектрів вперше кількісно визначено величину індивідуального зсуву довжини хвилі ЛД накачки у довгохвильову область із збільшенням його інтенсивності випромінювання. При зміні вихідної потужності кожного діода накачки від 100 мВт до 300 мВт зафіксовано зсув довжини хвилі випромінювача  $\sim$  десятих долей нм. Хоча цей зсув і відносно невеликий, але його слід враховувати у випадках, коли необхідне точне визначення частот стоксового зсуву в досліджуваних спектрах ПСВ.

Залежності густини потужності ПСВ зображено на рис. 2 як функції від зміни потужності помпування. Окремі виділені нами точки спектру розташовані не тільки поблизу від абсолютного максимуму стоксового спектру і тому набувають суттєво різних значень коефіцієнта ВКР підсилення. Зазначимо, що рівень спонтанного розсіяння визначається постійним поперечним перерізом КР і тому повинен бути зображений прямою лінією незалежно від конкретного типу волокна, як це показано на рис. 2.

Процедуру розділення виміряного значення загальної потужності ПСВ на дві

підсилювачі із зустрічною накачкою (рис. 1.) З метою доведення достовірності отриманих даних ми наводимо опис застосованої методики досліджень ВКР підсилення в оптичних волокнах, в межах якої розглядались головні особливості контрольно-вимірної апаратури для дослідження ВКР підсилення в оптичних волокнах, надано опис блок-схеми оптичного аналізатора спектра та схеми монохроматора у складі аналізатора спектра, параметри яких визначають чутливість та динамічний діапазон

окремі частини ми проводимо наступним чином:

- 1) потужність спонтанного стоксового випромінювання (прямі лінії на рис. 2), що відповідають некогерентному шуму;
- 2) «чисте» ВКР підсилення шуму, яке має експоненціальну залежність стоксової інтенсивності від потужності помпування  $P_0$ .

Нарешті наше моделювання базується на використанні модельної функції наступного вигляду:

$$P_{Nt}(x) = axe^{kx} + bx, \quad (4)$$

яке є наслідком співвідношення (3), де повна потужність шуму  $P_{Nt}$  розглядається як функція від незалежної змінної  $x = P_p$ . Нахил кожної прямої лінії на рис. 2 є сумою двох параметрів  $(a+b)$  як можна безпосередньо побачити із співвідношення (4) при  $k=0$ . Очевидно, що параметр  $k = g_R L_{eff}$  у відповідності до (3), а  $L_{eff} = 16,77$  км нашого ОМВ для  $\lambda_p = 1425$  нм.

Представлений пасивний метод вимірювання профілю ВКР підсилення в одномодових волокнах. Експериментальну методику вимірювань розроблено для стандартних волокон на основі кварцового скла. Проведено вимірювання спектральної густини оптичної потужності у стоксово зміщеній області до  $1600 \text{ см}^{-1}$  в одномодовому волокні довжиною 50 км. Головна перевага запропонованого методу полягає в суттєвому спрощенні методики вимірювань без використання зовнішніх сигналів із варіацією частоти, оскільки методика побудована на використанні вимірювань лише підсиленого спонтанного випромінювання в режимі холостого ходу у ВКР підсилювачі із зустрічною накачкою.

У *третьому розділі* спектроскопічні особливості профілів ВКР підсилення у чотирьох типах одномодових волокон на основі кварцового скла проаналізовані

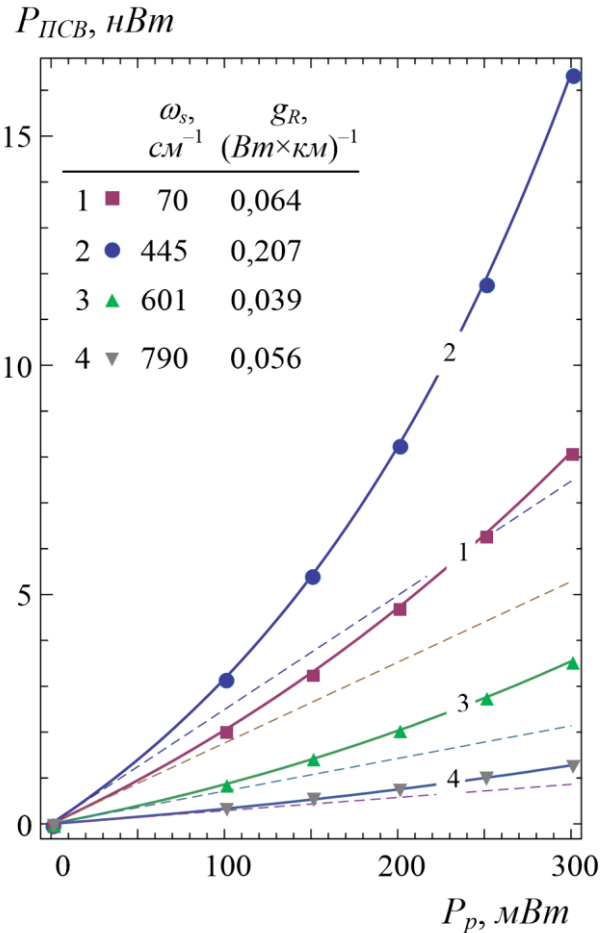


Рис. 2. Динаміка зміни спектральної густини потужності ПСВ в 4 окремих точках стоксового спектра. Наші експериментальні дані зображені 4-ма групами символів, а суцільні лінії зображують результати апроксимації за допомогою пробної функції. Потужність спонтанного розсіяння зображена пунктирними прямими лініями

шляхом їх виділення із експериментальних спектрів СКР з наступною багатомодовою декомпозицією на компоненти гаусового типу. Обґрунтування методики представлено на основі осциляторної моделі КР активних коливань молекулярних наноконкомплексів в аморфному склі з урахуванням як квантового, так і напівкласичного підходів. Показано, що температурні зміни спектрів СКР зосереджені у низькочастотній області спектру і при  $T = 300$  К більш ніж на порядок перевищують відповідні компоненти профілю ВКР на частотах  $\leq 20$   $\text{см}^{-1}$ , але стають практично непомітними на частотах понад  $800$   $\text{см}^{-1}$ .

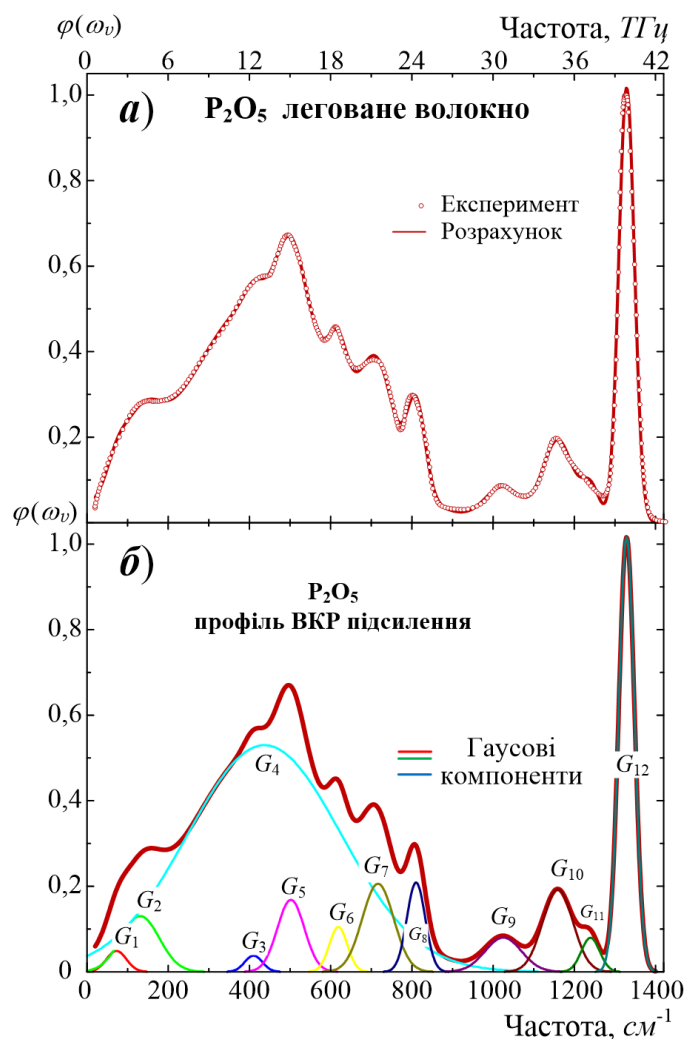


Рис. 3. Аналіз коливної динаміки  $\text{P}_2\text{O}_5$  домішкових наноконкомплексів при формування профілів ВКР підсилення у серцевині ОМВ із кварцового скла: а) багатомодова апроксимація (суцільна лінія) експериментального профілю (точки); б) декомпозиція на 12 гаусових компонент в області стоксового зсуву  $0-1400$   $\text{см}^{-1}$  ( $0-42$  ТГц).

Таблиця 1.

Параметри гаусової декомпозиції профілю ВКР підсилення у  $\text{P}_2\text{O}_5$  легованих кварцових волокнах. Точність наближення представлена параметром  $\delta = (I_G - I_0)/I_0 \cdot 100\%$ , де  $I_G$  та  $I_0$  – відповідні інтегральні інтенсивності в обчислених та виміряних стоксових спектрах.

№ п/п	$\text{P}_2\text{O}_5$ $g_{Rmax}=5,7^a$ ( $\text{Вт} \cdot \text{км}$ ) $^{-1}$				
	$A_i$	$\omega_i$ [ $\text{см}^{-1}$ ]	$\omega_i$ ТГц	$\Gamma_i$ [ $\text{см}^{-1}$ ]	$\Gamma_i$ ТГц
1	2	3	4	5	6
$G_1$	0,05	72	2,2	35	1,05
$G_2$	0,13	131	3,9	67	2,01
$G_3$	0,53	437	13,1	268	8,04
$G_4$	0,04	410	12,3	31	0,93
$G_5$	0,17	502	15,1	47	1,41
$G_6$	0,11	618	18,5	31	0,93
$G_7$	0,21	716	21,5	55	1,65
$G_8$	0,21	810	24,3	32	0,96
$G_9$	0,08	1025	30,8	63	1,89
$G_{10}$	0,19	1159	34,8	53	1,59
$G_{11}$	0,08	1240	37,2	32	0,96
$G_{12}$	1,02	1329	39,9	27	0,81
Точність наближення $\delta=0,1$ %					
<sup>a</sup> . Оцінка шляхом порівняння із $\text{GeO}_2$ ОМВ.					

Аналіз коливної динаміки  $\text{P}_2\text{O}_5$  домішкових наноконкомплексів при формування

профілів ВКР підсилення у серцевині ОМВ із кварцового скла подано на рис. 3: а) багатомодова апроксимація (суцільна лінія) експериментального профілю (точки); б) декомпозиція на 12 гаусових компонент в області стоксового зсуву  $0-1400\text{ см}^{-1}$  ( $0-42\text{ ТГц}$ ). У таблиці 1 містяться параметри гаусової декомпозиції профілю ВКР підсилення у  $\text{P}_2\text{O}_5$  легованих кварцових волокнах. Зауважимо, що отримана точність наближення, яка представлена параметром  $\delta=0,1\%$  (див. таб. 1).

З'ясовано, що легуючі домішки набагато сильніше збурюють нелінійний спектр ВКР підсилення – до порядку за величиною, – порівняно із зміною лінійних параметрів серцевини волокон, оскільки відповідні зміни показника заломлення  $\Delta n \sim 0,01$ .

Сильна деформація профілів ВКР підсилення виникає внаслідок значної перебудови спектрів коливних мод молекулярних нанокомплексів серцевини волокон під впливом відносно невеликих концентрацій домішок. За результатами гаусової декомпозиції на 12 компонент у чистому  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  і  $\text{TiO}_2$  та на 11 компонент у  $\text{GeO}_2$  легovanому волокні встановлено, що головні коливні моди матриці скла, які формують профілі ВКР підсилення у волокнах, значно змінюються за всіма параметрами коливань – у кілька разів за амплітудою, в межах десятків  $\text{см}^{-1}$  за частотним положенням та сталими загасання. Тому середнє значення часу релаксації процесів ВКР складає  $\tau_i \approx 300\text{ фс}$ , що, по-перше, забезпечує можливість практичного використання ВКР підсилювачів та генераторів світла у терагерцовій смузі робочих частот. По-друге, саме цей часовий інтервал вказує на фундаментальну межу застосовності квазістаціонарного наближення, тобто, базових зв'язаних рівнянь нелінійної ВКР взаємодії хвиль для моделювання телекомунікаційних систем із терабітною пропускнуою спроможністю.

Декомпозиція надає практично точну апроксимацію експериментальних даних та складає надійну основу для обчислення головних параметрів ВКРП. Простий аналітичний вигляд апроксимуючих функцій у вигляді лінійної комбінації експонент є істотною перевагою представленого метода і виявляється корисним для моделювання параметрів підсилення, зокрема для визначення спектральної щільності оптичного шуму, смуг лазерної генерації для заданих параметрів помпування, оптимізації величини групової затримки у ВКРП з багато хвильовою накачкою та для створення відповідних пристроїв корекції.

**Четвертий розділ** роботи присвячено прикладним аспектам застосування отриманих результатів щодо коливної динаміки молекулярних нанокомплексів у серцевині волокон, оскільки в роботі властивості ВКР підсилення одномодових волокон, зокрема легованих  $\text{TiO}_2$ , досліджувались з метою їх застосування у нових фотонних пристроях. Головні особливості ВКР підсилення в ОМВ, легovanому  $\text{TiO}_2$ ,

визначались шляхом порівняння з найбільш ефективним на теперішній час активним середовищем для ВКРЛ, а саме з КР волокном (сильно легованим  $\text{GeO}_2$ ).

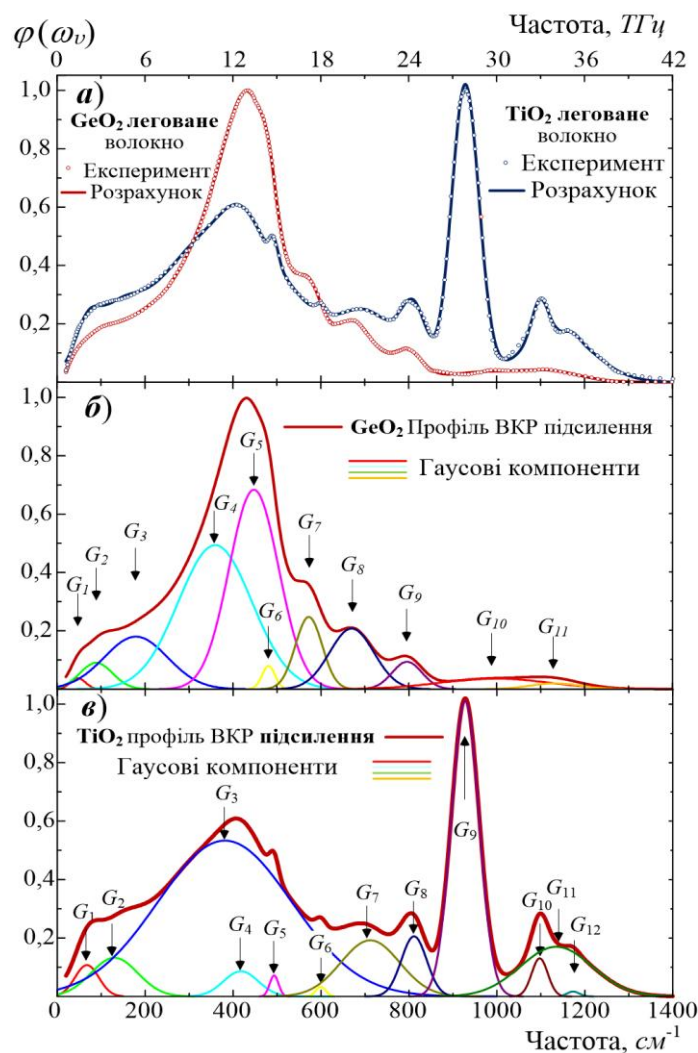


Рис. 4. Багатомодова гауссова декомпозиція профілів ВКР підсилення:  
**а)** експериментальні точки (кола) у порівнянні із розрахунковими профілями ВКР підсилення (суцільні лінії), що обчислені за допомогою аналітичних виразів (5)-(6);  
**б)** та **в)** профілі ВКР підсилення як результат суперпозиції кількох гаусових компонент

Таблиця 2.

Декомпозиція профілю ВКР підсилення на 12 гаусових компонент у  $\text{TiO}_2$  легованому волокні (діапазон від  $20 \text{ cm}^{-1}$  до  $1400 \text{ cm}^{-1}$ ).

№ п/п	$\text{TiO}_2 \ g_{Rmax}=4.8^a \ (\text{Вт} \cdot \text{км})^{-1}$				
	$A_i$	$\omega_i$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$\omega_i$ ТГц	$\Gamma_i$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$\Gamma_i$ ТГц
1	2	3	4	5	6
$G_1$	0,11	67	2,0	38	1,1
$G_2$	0,13	130	3,9	75	2,3
$G_3$	0,53	381	11,4	215	6,5
$G_4$	0,09	418	12,5	56	1,7
$G_5$	0,07	493	14,8	14	0,4
$G_6$	0,03	599	18,0	16	0,5
$G_7$	0,19	712	21,4	94	2,8
$G_8$	0,21	811	24,3	41	1,2
$G_9$	1,00	928	27,8	44	1,3
$G_{10}$	0,13	1097	32,9	26	0,8
$G_{11}$	0,17	1135	34,1	115	3,5
$G_{12}$	0,02	1173	35,2	20	0,6

<sup>b</sup> Оцінка шляхом порівняння із  $\text{GeO}_2$  ОМВ (див. рис.4.1б).

Дійсно, за даними таблиці 2 для досліджуваного  $\text{TiO}_2$  легованого волокна профіль ВКР підсилення  $g_{R_{\text{TiO}_2}}(\omega) = g_{R_{\text{max-TiO}_2}} \cdot \varphi_1(\omega) = 4,8 \cdot \varphi_1(\omega) \ (\text{Вт} \cdot \text{км})^{-1}$ , де функція форми профілю  $\varphi_1(\omega)$  матиме найбільш компактний вигляд:

$$\begin{aligned}
\varphi_1(\omega) = & 0,11e^{-0,77(\omega-2)^2} + 0,13e^{-0,2(\omega-3,9)^2} + 0,53e^{-0,2(\omega-11,4)^2} + \\
& + 0,09e^{-0,35(\omega-12,5)^2} + 0,07e^{-5,67(\omega-14,8)^2} + 0,03e^{-4,34(\omega-18)^2} + \\
& + 0,19e^{-0,13(\omega-21,4)^2} + 0,21e^{-0,66(\omega-24,3)^2} + 1,0e^{-0,57(\omega-27,8)^2} + \\
& + 0,13e^{-1,64(\omega-32,9)^2} + 0,17e^{-0,08(\omega-34,1)^2} + 0,02e^{-2,78(\omega-35,2)^2},
\end{aligned} \tag{5}$$

якщо частоту  $\omega$  та загасання  $\Gamma$  задавати у ТГц. Загальний вигляд розрахованих та експериментальних профілів ВКР підсилення в обох типах  $\text{GeO}_2$ - та  $\text{TiO}_2$ -легованих волокон подано разом на рис. 4 а, що надає можливість безпосередньо оцінити ступінь відповідності аналітичних обчислень до вимірюваних спектрів. За допомогою рис. 4б і в проведено аналіз коливної динаміки  $\text{GeO}_2$  та  $\text{TiO}_2$  домішкових наноконструкцій при формуванні профілів ВКР підсилення у серцевині ОМВ із кварцового скла: б) декомпозиція на 11 гаусових компонент кварцового волокна із  $\text{GeO}_2$ -легованою серцевиною та в) декомпозиція на 12 гаусових компонент  $\text{TiO}_2$ -легованого кварцового волокна в області стоксового зсуву  $0-1400 \text{ см}^{-1}$  ( $0-42 \text{ ТГц}$ ).

Аналогічно, для  $\text{GeO}_2$  легovanого волокна профіль ВКР підсилення  $g_{R_{\text{GeO}_2}}(\omega) = g_{R_{\text{max}_{\text{GeO}_2}}} \cdot \varphi_2(\omega) = 6,3 \cdot \varphi_2(\omega) \text{ (Вт}\cdot\text{км)}^{-1}$ , де функція форми профілю  $\varphi_2(\omega)$  матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
\varphi_1(\omega) = & 0,04e^{-1,78(\omega-1,4)^2} + 0,09e^{-0,4(\omega-2,7)^2} + 0,18e^{-0,11(\omega-5,4)^2} + \\
& + 0,49e^{-0,08(\omega-10,8)^2} + 0,68e^{-0,17(\omega-13,4)^2} + 0,08e^{-2,52(\omega-14,4)^2} + \\
& + 0,25e^{-0,6(\omega-17,2)^2} + 0,21e^{-0,22(\omega-20,1)^2} + 0,09e^{-0,48(\omega-23,9)^2} + \\
& + 0,04e^{-0,04(\omega-29,9)^2} + 0,02e^{-0,17(\omega-34)^2}.
\end{aligned} \tag{6}$$

Нарешті, за даними таблиці 1 для досліджуваного  $\text{P}_2\text{O}_5$  легovanого волокна профіль ВКР підсилення  $g_{R_{\text{P}_2\text{O}_5}}(\omega) = g_{R_{\text{max}_{\text{P}_2\text{O}_5}}} \cdot \varphi_3(\omega) = 5,7 \cdot \varphi_3(\omega) \text{ (Вт}\cdot\text{км)}^{-1}$ , де функція форми профілю  $\varphi_3(\omega)$  матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
\varphi_3(\omega) = & 0,05e^{-0,91(\omega-2,2)^2} + 0,13e^{-0,25(\omega-3,9)^2} + 0,53e^{-0,02(\omega-13,1)^2} + \\
& + 0,04e^{-1,16(\omega-12,3)^2} + 0,17e^{-0,5(\omega-15,1)^2} + 0,11e^{-1,16(\omega-18,5)^2} + \\
& + 0,21e^{-0,37(\omega-21,5)^2} + 0,21e^{-1,09(\omega-24,3)^2} + 0,08e^{-0,28(\omega-30,8)^2} + \\
& + 0,19e^{-0,4(\omega-34,8)^2} + 0,08e^{-1,09(\omega-37,2)^2} + 1,0e^{-1,59(\omega-39,9)^2},
\end{aligned} \tag{7}$$

Розповсюдження стоксової хвилі без втрат вздовж напрямку  $z$  волокна на практиці означає, що її інтенсивність  $I_s$  залишається незмінною за величиною вздовж  $z$ -координати волокна. Ця умова дозволяє дати безпосереднє визначення функції абсолютної прозорості  $P_p^{th}(\omega)$  у наступному кількісному вигляді:



$$P_p^{th}(\omega) = \frac{\alpha_s(\omega)}{g_R(\omega)}, \quad (8)$$

де  $\alpha_s$  – коефіцієнт згасання, який в загальному випадку є функцією від частоти.

Зазначимо, що функція абсолютної прозорості  $P_p^{th}(\omega)$  (8) дає значення потужності накачки, за якої настає поріг лазерної генерації, в залежності від частоти  $\omega$  стоксового зсуву. Тому, якщо у виразі (8) використати аналітичну форму (5)-(7) для профілів ВКР підсилення  $g_R(\omega)$ , то для функції абсолютної прозорості

$P_p^{th}(\omega)$  також матимемо аналітичний вираз.

Як приклад застосування функції абсолютної прозорості  $P_p^{th}(\omega)$  ми порівняли смуги ВКР підсилення у  $\text{GeO}_2$  та  $\text{TiO}_2$  легованих волокнах за двох значень потужності накачки – 18 дБм та 23 дБм. Для моделювання було вибрано два джерела накачки на довжині хвилі  $\lambda_p = 1,45$  мкм (для  $\text{GeO}_2$  легованого ОМВ) та  $\lambda_p = 1,355$  мкм (для  $\text{TiO}_2$  легованого ОМВ). Результати моделювання обох смуг ВКР підсилення подано на рис. 5. Такий вибір довжин хвилі помпування забезпечує мінімум порогу ВКР підсилення в центрі С віна прозорості ( $\lambda = 1,55$  мкм) кожного типу ОМВ.

Якщо потужність  $P_p = 18$  дБм (63 мВт), то генерацію слід очікувати у 4 окремих смугах (рис. 5а). Показано, що при незначному збільшенні порогової потужності накачки до 23 дБм в  $\text{TiO}_2$  ВКРЛ, його монохроматичну довжину хвилі генерації можна реалізувати в межах майже вдвічі ширшої та неперервної спектральної області, порівняно з можливим діапазоном генерації лазерів в  $\text{GeO}_2$  легованому волокні.

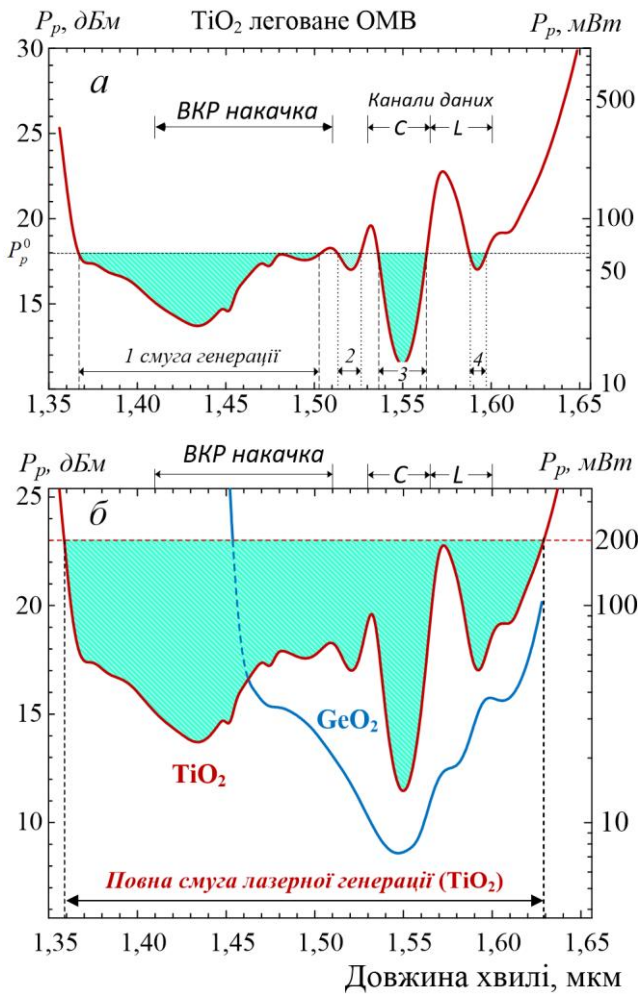


Рис. 5 Застосування функції абсолютної прозорості для визначення смуг лазерної генерації для  $\text{TiO}_2$  легованого ( $\lambda_p = 1,355$  мкм):

а – утворення 4 окремих смуг генерації при  $P_p = 63$  мВт (18 дБм) в області прозорості кварцового скла;

б - порівняння повних смуг лазерної генерації при  $P_p = 200$  мВт (23 дБм) у  $\text{GeO}_2$  ( $\lambda_p = 1,45$  мкм) та  $\text{TiO}_2$  легованих волокнах.



Це підтверджується нашими числовими результатами моделювання, які дають безперервну смугу перебудови лінії генерації лазера в одномодовому волокні, легovanому  $\text{TiO}_2$ , що може дорівнювати до 270 нм при відносно низькій потужності накачування, яка не перевищує 200 мВт. Профілі ВКР підсилення визначаються за допомогою оригінального спектроскопічного методу, розробленого на надійній базі фундаментальної теорії та вимірних значень поперечного перерізу спонтанного комбінаційного розсіювання в досліджуваних волокнах. Ми використовували стандартну спектроскопічну процедуру багатомодової декомпозиції виключно для практичної мети досягнення максимальної точності наближення нерівномірного стоксового континууму частот за допомогою оптимальної кількості гаусових компонент. Це дозволяє отримати аналітичну форму практично точної апроксимації експериментальних профілів ВКР підсилення досліджуваних волокон за допомогою кількох гаусових мод.

В роботі з'ясовано, що профілі ВКР підсилення можуть мати сильні деформації за рахунок суттєвої реструктуризації коливних спектрів молекулярних наноконкомплексів у серцевині волокон під впливом відносно невеликих концентрацій домішок.

Таким чином, майже точна апроксимація (з точністю не гірше за 0,1%) експериментального спектра підсилення може бути побудована з використанням тільки гаусових компонент (рис. 6). Прикладні можливості нашого моделювання продемонстровано шляхом розрахунку головних параметрів ВКРЛ. Важливою перевагою нашого метода є простий аналітичний вираз для апроксимуючих функцій у вигляді лінійної комбінації експонент. Це може бути дуже корисним при моделюванні параметрів підсилювачів, зокрема для обчислення спектральної густини оптичного шуму та для визначення смуг лазерної генерації для заданих параметрів помпування.

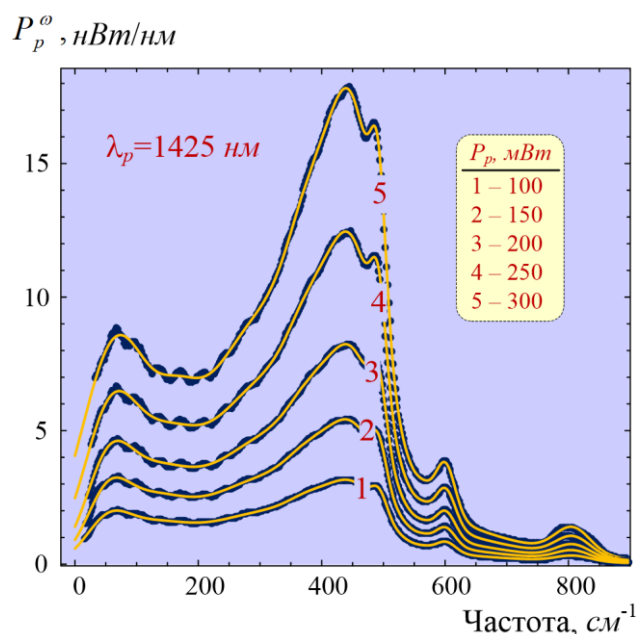


Рис. 6 Результат фільтрації шумів вимірювальної апаратури при реєстрації спектрів ПСВ у ВКРЛ із зворотною накачкою на довжині хвилі  $\lambda_p=1425$  нм.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи експериментально та теоретично (числовим моделюванням) досліджено коливну динаміку домішкових наноконкомплексів при формуванні терагерцових смуг нелінійно-оптичного підсилення та лазерної генерації, що виникають в результаті вимушеного комбінаційного випромінювання у кварцових волокнах, зокрема:

1. В роботі вивчені спектри підсиленого спонтанного випромінювання (ПСВ) за рахунок ефекту вимушеного комбінаційного розсіяння в режимі холостого ходу підсилювача, тобто без сигналу на вході волокна. Така схема експериментальних спостережень дозволила провести аналіз максимальної потужності ПСВ оскільки за відсутності сигналу вся потужність накачування витрачається лише на підсилення шуму. Досліджена динаміка залежності спектрів підсиленого спонтанного випромінювання при зміні потужності помпування в одномодовому волокні із чистого кварцу для чотирьох окремих джерел накачки із різними довжинами хвилі випромінювання.
2. Вперше аналіз спектрів проводився в розширеній спектральній області, яка об'єднує релеєвський та стоксово зсунутий діапазон частот. При аналізі експериментальних даних релеєвських спектрів вперше кількісно визначено величину індивідуального зсуву довжини хвилі ЛД накачки у довгохвильову область із збільшенням його інтенсивності випромінювання. При зміні вихідної потужності кожного діода накачки від 100 мВт до 300 мВт зафіксовано зсув довжини хвилі випромінювача  $\sim$  десятих долей нм. Хоча цей зсув і відносно невеликий, але його слід враховувати у випадках, коли необхідне точне визначення частот стоксового зсуву в досліджуваних спектрах ПСВ.
3. Експериментально доведено, що спектри підсиленого спонтанного випромінювання спостерігаються у вигляді суміші, що складається із підсиленого та спонтанного стоксового шуму, на що вказує по-перше, нелінійна залежність спектральних компонент ПСВ від потужності накачки, і, по-друге, наявність характерних локальних максимумів на всіх без винятку спектрах ПСВ в області малих стоксових зсувів.
4. Вдосконалено метод пасивного визначення профілю ВКР підсилення одномодового волокна із чистого кварцового скла шляхом застосування гаусової фільтрації шумів вимірювальної апаратури. Експериментальна методика була апробована (але не обмежена) стандартними типами оптичних волокон та продемонстрована на вимірюваннях стоксового ПСВ на відрізку ОМВ довжиною 50 км із чистого кварцового скла. Суттєве спрощення запропонованого методу полягає у виключенні необхідності використання зовнішніх оптичних сигналів, з використанням вимірювань тільки потужності ПСВ.

## Список опублікованих праць за темою дисертації

### Колективні вітчизняні монографії

1. Григорук В. І. Взаємодія фізичних полів з наноструктурованими матеріалами. Волоконні ВКР лазери та підсилювачі оптичного випромінювання / В. І. Григорук, І. В. Сердега, Г. С. Фелінський, П. А. Коротков. – Київ: Каравела, 2018. – С. 62–128. ISBN 978-966-2229-77-6. *(Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків методом багатомодової гаусової декомпозиції, створення моделі для визначення порогу лазерної генерації у волокнах зі складною формою спектрів ВКР підсилення, обговорення та аналіз результатів, робота над текстом видання).*

### Колективні зарубіжні монографії

2. Petrychuk M. V. Interaction of physical fields with nanostructured materials. Light amplification based on stimulated Raman effect and spectroscopic modeling of Raman gain in single mode fiber / M. V. Petrychuk, V. I. Grygoruk, S. P. Pavlyuk, I. V. Serdega, G. S. Felinskyi, V.I. Kanevskii, S.O. Kolienov, S.N. Savenkov, E.A. Oberemok, I.S. Kolomiets, A.S. Klimov, A.O. Sitnichenko, V.V. Oliynyk, V.V. Zagorodnii, L.Yu. Matzui, L.L. Vovchenko, I.A. Gural'skiy, O.I. Kucheriv, M.O. Popov, V.L. Launets, A.L. Nikytenko, S. Vitusevich. – Jülich: Schriften des Forschungszentrums Jülich, 2020. – Vol. 211. – P. 47–110. ISBN 978-3-95806-450-8. *(Особистий внесок здобувача: проведення числової апроксимації профілів ВКР підсилення методами нелінійної регресії, створення моделі мультигаусової декомпозиції спектрів ВКР складної форми, обговорення та аналіз результатів, робота над текстом видання).*

### Статті у наукових фахових вітчизняних виданнях

3. Hayday Yu. Forced frequency synchronization effect in the microwave microscope with the active probe / Yu. Hayday, V. Sidorenko, O. Sinkevych, I. Serdega // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. – 2013. – Вип. 1. – С. 15–17.  
*(Особистий внесок здобувача - підготовка дослідних зразків до вимірювань, проведення числових розрахунків, допомога в проведенні натурних вимірювань, аналіз результатів, робота над текстом статті, обговорення та аналіз результатів).*
4. Гайдай Ю. О. Близькопольовий мікрохвильовий мікроскоп з активним зондом модуляційного типу / Ю. О. Гайдай, В. С. Сидоренко, С. Л. Скрипка, Ю. Г. Семенець, І. В. Сердега // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Фізико-математичні науки. – 2014. – Вип. 1. – С. 215–220.  
*(Особистий внесок здобувача - проведення числових розрахунків з обробки даних вимірювань, допомога в проведенні натурних вимірювань, аналіз результатів, робота над текстом статті, обговорення та аналіз результатів).*

5. Григорук В. І. Смуга лазерної генерації та поріг ВКР підсилення в одномодових волокнах, легованих  $\text{TiO}_2$  / В. І. Григорук, І. В. Сердега, Г. С. Фелінський // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Фізико-математичні науки. – 2016. – Вип. 3. – С. 125–130.  
(Особистий внесок здобувача: числове моделювання ВКР підсилення у  $\text{TiO}_2$ -легованих волокнах та смуг лазерної генерації, аналіз точності результатів апроксимації, аналіз результатів, робота над текстом статті, обговорення та аналіз результатів).
  6. Сердега І. В. Спектроскопічні особливості профілів ВКР підсилення в одномодових волокнах на основі кварцового скла / І. В. Сердега, В. І. Григорук, Г. С. Фелінський // Український фізичний журнал. – 2018. – Т. 63. – № 8. – С. 681–699.  
(Особистий внесок здобувача: створення багатомодової моделі профілів ВКР підсилення кварцових волокон, проведення числових розрахунків методом нелінійної регресії, обговорення та аналіз результатів, робота над текстом статті).
  7. Felinskyi G. S. Modelling of gain profiles and Raman lasing in  $\text{TiO}_2/\text{GeO}_2$ -doped silica fibres / G. S. Felinskyi, V. I. Grygoruk and I. V. Serdega // Ukrainian Journal of Physical Optics. – 2020. – № 1. – Vol. 21. – P. 15–25.  
(Особистий внесок здобувача: числові розрахунки профілів ВКР підсилення та смуг лазерної генерації у  $\text{TiO}_2$ - та  $\text{GeO}_2$ -легованих волокнах, аналіз точності результатів апроксимації, обговорення та аналіз результатів).
- Тези доповідей міжнародних конференцій, симпозіумів і форумів, які засвідчують апробацію результатів дисертації*
8. Felinskyi G. S.  $\text{TiO}_2$ -doped Singlemode Fiber as Active Medium for Raman Lasers / G. S. Felinskyi, I. V. Serdeha, V. I. Grygoruk // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 753. – P. 173–179. ISSN: 1662-9795.  
(Особистий внесок здобувача: числові розрахунки профілів ВКР підсилення та смуг лазерної генерації у  $\text{TiO}_2$ -легованому волокні, аналіз точності результатів апроксимації, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів стендової доповіді, робота над текстом статті).
  9. Grygoruk V. I. Nano-localization of photochemical polishing processes the surface roughness via evanescent wave / V. I. Grygoruk, D. Vasilenko, V. S. Sidorenko, I. V. Serdeha // XIV International young scientists' conference on Applied Physics, 15-18 June, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2016. – P. 209–210.  
(Особистий внесок здобувача - підготовка дослідних зразків до вимірювань, проведення числових розрахунків, допомога в проведенні натурних вимірювань, аналіз результатів, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді).
  10. Grygoruk V. I. The definition of subsurface layers permittivity distribution in near-field microscopy / V. I. Grygoruk, P. Kravchuk, S. Horielov, V. S. Sidorenko, and I. V. Serdeha // XIV International young scientists' conference on Applied Physics, 15-18 June, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2016. – P. 90–91.

*(Особистий внесок здобувача - проведення числових розрахунків з обробки даних вимірювань розподілу діелектричної проникності, допомога в проведенні натурних вимірювань, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді).*

11. Serdeha I. V. Spectroscopic features of Raman gain profile in singlemode fibers / I. V. Serdeha, G. S. Felinskyi // XXIII Galyna Puchkovska Int. School-Seminar: Spectroscopy of Molecules and Crystals, 25-27 Sept., Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2017. – P. 242.

*(Особистий внесок здобувача: створення багатомодової моделі профілів ВКР підсилення кварцових волокон, проведення числових розрахунків методом нелінійної регресії, аналіз результатів, робота над текстом публікації, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді, доповідь на конференції).*

12. Serdeha I. V. Spectroscopic model for Raman lasing in  $\text{TiO}_2$ -doped single-mode fiber / I. V. Serdeha, I. M. Kudin, G. S. Felinskyi // XVII International young scientists' conference on Applied Physics, May 23-27, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2017. – P. 23–24.

*(Особистий внесок здобувача: числові розрахунки профілів ВКР підсилення та смуг лазерної генерації у  $\text{TiO}_2$ -легованому волокні, аналіз точності результатів апроксимації, робота над текстом публікації, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді).*

13. Сердега І. В. Спектр нелінійно-оптичного підсилення у фосфор-силікатному одномодовому волокні / І. В. Сердега, В. І. Григорук, Г. С. Фелінський // Всеукраїнська науково-практична конференція: Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем MEICS-2017, 22-24 листопада, Дніпро, Україна. – Дніпро, 2017. – P. 191–192.

*(Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків профілів ВКР підсилення у  $\text{P}_2\text{O}_5$ -легованому волокні, створення моделі коливної динаміки для спектральних ВКР профілів складної форми, аналіз результатів числових розрахунків, робота над текстом публікації, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді).*

14. Serdeha I. V. Multimode gaussian decomposition of Raman gain profile in  $\text{P}_2\text{O}_5$ -doped silica fiber / I. V. Serdeha G. S. Felinskyi // XII International conference «Electronics and Applied Physics», Oct. 24-27, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2017. – P. 18–19.

*(Особистий внесок здобувача: проведення числової апроксимації профілів ВКР підсилення у  $\text{P}_2\text{O}_5$ -легованому волокні, апробація гаусової моделі коливної динаміки для спектральних ВКР профілів складної форми, аналіз результатів числових розрахунків, робота над текстом публікації, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді).*

15. Felinskyi G.S. Lasing band and raman gain threshold in  $\text{TiO}_2$  doped single-mode fiber / G.S.Felinskyi, I.M. Kudin, I.V. Serdeha // IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 18-20, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2017. – P. 108–111.

*(Особистий внесок здобувача: проведення числової апроксимації профілів ВКР підсилення у  $\text{TiO}_2$ -легованому волокні методами нелінійної регресії, моделювання*

коливної динаміки профілів ВКР підсилення складного континуального виду, обговорення та аналіз результатів, робота над текстом статті, підготовка матеріалів доповіді ).

16. Serdeha I. V. Spectroscopic Analysis of Raman Lasing Features in  $P_2O_5$  Doped Single-Mode Fiber / I. V. Serdeha, G. S. Felinskyi and V. I. Grygoruk // IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2018, April 24-26, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2018. – P. 209–212.  
(Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків спектрів нелінійного підсилення у  $P_2O_5$ -легованому волокні методом Левенберга-Марквардта, апробація гаусової моделі коливної динаміки для спектральних ВКР профілів складної форми, аналіз результатів числових розрахунків, робота над текстом публікації, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді, доповідь на конференції).
17. Serdeha I. V. Method of Gaussian filtration of photodetector noise in the amplification spectra of fiber Raman amplifier / I.V. Serdeha, D.V. Bratanych, G.S. Felinskyi, M. I. Reznikov // XVIII Int. young scientists conference on Appl. Physics, May 22-26, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2018. – P. 8–9.  
(Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків з обробки даних вимірювання, створення багатомодової моделі згладжування шумів у вимірних спектрах ПСВ складної форми, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді).
18. Serdeha I. V. Pumping wavelength dependence of Raman lasing threshold in highly Ge-doped silica fiber / I. V. Serdeha, S. V. Honenko, G. S. Felinskyi, M. I. Reznikov // XIV International conference: Electronics and Applied Physics, Oct. 21-25, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2018. – P. 166–167.  
(Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків порогових умов ВКР лазерної генерації у Ge-легованому волокні, створення моделі для сплайн-апроксимації оптичних втрат, вимірювань в усіх вікнах прозорості Ge-легованого волокна, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді).
19. Сердега І. В. Коливна динаміка молекулярних наноконкомплексів у кварцових волокнах при формуванні терагерцових смуг оптичного ВКР підсилення та лазерної генерації / І. В. Сердега, В. І. Григорук, Г. С. Фелінський // VIII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (УНКФН-8), 2-4 жовтня, Ужгород, Україна. – Ужгород, 2018. – P. 276–277.  
(Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків профілів ВКР підсилення в терагерцовій області стоксового зсуву, апробація моделі коливної динаміки спектрів ВКР складної форми, порівняльний аналіз результатів для різних волокон, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді).
20. Сердега І. В. Нелінійна апроксимація профілів ВКР підсилення світла в активних лазерних та телекомунікаційних волокнах на основі кварцового скла / І. В. Сердега., Г. С. Фелінський // VIII International Conference on Optoelectronic Information Technologies, PHOTONICS – ODS, VNTU, October 2 – 4, Vinnytsia, Ukraine, 2018. – Vinnytsia. – P. 207–208.

*(Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків профілів ВКР підсилення методами нелінійної регресії, створення моделі багатокomпонентної гаусової апроксимації ВКР профілів складної форми, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів доповіді).*

21. Serdeha I. V. Passive Method for Raman Gain Measurement Using Backward Pumped Fiber Configuration / I. V. Serdeha, G. S. Felinskyi and V. I. Grygoruk // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2019, April 24-26, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2019. – P. 197–200.

## АНОТАЦІЯ

**Сердега І. В. Коливна динаміка домішкових нанокomплексів при формуванні терагерцових смуг нелінійно-оптичного підсилення у кварцових волокнах. -**  
Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2020.

Дисертаційна робота присвячена експериментальним дослідженням нелінійного оптичного підсилення світла та числовому моделюванню коливної динаміки домішкових нанокomплексів, яка формує профілі ВКР підсилення світла в різних типах одномодових волокон на основі кварцового скла. Актуальність теми у даний час обумовлена підвищенням інтересом до аналізу фізичних особливостей індивідуального та колективного впливу фононних коливань у серцевині волокон, які власне визначають ефективність підсилення оптичних сигналів за допомогою вимушеного комбінаційного розсіяння світла. В роботі проаналізовано наявні експериментальні дані вимірювання підсиленого спонтанного випромінювання за схемою із зустрічною накачкою кварцового одномодового волокна в області 1420 нм...1650 нм. В роботі вперше запропоновано методику кількісного визначення величини індивідуального зсуву довжини хвилі ЛД накачки від інтенсивності його випромінювання.

**Ключові слова:** нелінійні оптичні явища, хвилі в активних середовищах, квантові генератори і підсилювачі, фотон-фононна взаємодія, коливна динаміка, молекулярні нанокomплекси, оптичне підсилення.

## ABSTRACT

**Serdeha I. V. Oscillatory dynamics of doping nanocomplexes at the terahertz bands formation of nonlinear optical amplification in silica fibers.** - Qualifying scientific work on the manuscript rights.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences on a specialty 01.04.03 – Radiophysics, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to experimental research of nonlinear optical amplification of light in singlemode fibers based on the silica glass and it contained the numerical modeling of oscillatory dynamics of doping nanocomplexes, which forms the Raman gain profiles of light in the different types of singlemode fibers based on the silica glass. Actuality currently due to increased interest in analyzing physical characteristics of individual and collective influence of phonon vibrations in the fiber core that really determine the gain effectiveness of optical signals using stimulated Raman effect. The available experimental data of measurement of amplified spontaneous emission (ASE) using to the counter-pumping scheme in the silica singlemode fiber at the region of 1420 nm...1650 nm are analyzed; the peculiarities of the oscillatory dynamics of impurity nanocomplexes on the formation of optical amplification due to stimulated Raman effect by multimode decomposition in several types of silica fibers have been studied. The method of separation onto stimulated and spontaneous parts in the measured ASE spectra was improved. The Gaussian filtering technique of the measuring equipment noises at ASE registration in the idling mode of the nonlinear optical amplifier is developed. For the first time the quantitative determination technique of values of individual pumping LD wavelength shifts as function of its radiation intensity is offered in this work.

The dissertation contains a detailed description of the new measuring method of the Raman gain profile of light in singlemode fibers. The main advantage of this method is a significant simplification of the measurement technique without using of external signals. According to the results of the oscillatory dynamics studies of impurity nanocomplexes in glass by Gaussian decomposition into 12 components in pure  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$  and into 11 components in a  $\text{GeO}_2$  doped fiber, for the first-time complex Raman gain profiles are presented in the form of relatively simple function of one variable, namely it is frequency.

**Key words:** nonlinear optical phenomena, waves in active media, quantum generators and amplifiers, photon-phonon interaction, oscillatory dynamics, molecular nanocomplexes, optical amplification, Raman gain profile, forced Raman scattering.